

論文 格子モデルによる軸力と曲げを受ける RC 柱部材の塑性変形性能の予測

三木 朋広^{*1}・Manakan LERTSAMATTIYAKUL^{*1}・二羽 淳一郎^{*2}

要旨: 鉄筋コンクリート (RC) 部材のせん断耐荷機構を明確かつ簡便に評価できる手法である格子モデルを用いて、軸力と水平力が同時に作用する RC 柱部材の塑性変形性能を解析的に評価した。RC 柱部材の正負交番載荷実験の結果と繰り返し応力場に拡張された格子モデルによる予測の比較を行った結果、本解析手法により、一定軸力、または変動軸力の作用している RC 柱部材の塑性変形性能の予測が可能であることが明らかになった。

キーワード: 鉄筋コンクリート柱部材、変動軸力、塑性変形性能、格子モデル

1. はじめに

ラーメン橋脚のような不静定構造物は、従来、耐震性に優れていると考えられていたが、兵庫県南部地震で多数の被害が生じたことから、大地震を受けた場合のラーメン橋脚に対する耐震性状の把握が必要となってきている。一般に、ラーメン構造物は、地震時に水平方向の力を受けることによって、柱基部に押し込みと引き抜きの変動軸力が作用することが知られている。そこで本研究では、一定軸力、及び変動軸力が作用する場合の RC 柱部材の塑性変形性能を、格子モデルにより評価することを試みた。すなわち、本解析手法の妥当性を検討するため、同一寸法、強度、配筋の RC 正方形断面柱供試体に対して、一定軸力、及び変動軸力の作用下で水平方向の繰り返し載荷を行った実験結果と格子モデルによる解析結果を比較した。

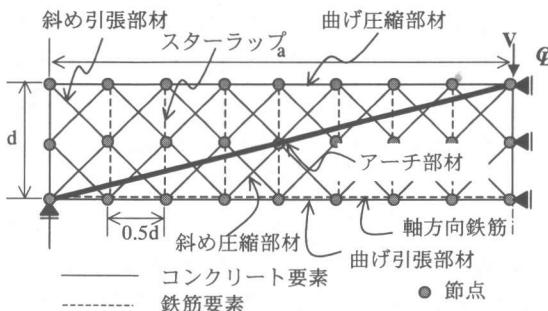


図-1 格子モデルの概略

2. 解析モデル

2.1 格子モデルの概要

格子モデル¹⁾では、図-1 に示すように、コンクリートは曲げ圧縮部材、曲げ引張部材、斜め圧縮部材、斜め引張部材、端部垂直部材、アーチ部材に離散化される。補強筋は水平部材、垂直部材（スターラップ）にモデル化される。

コンクリートの斜め圧縮部材と斜め引張部材を、45 度と 135 度方向に規則的に配置し、さらに端部節点以外で、変位が独立な細長い部材であるアーチ部材を組み込むことにより、斜めひび割れ発生後、マクロ的な圧縮力の方向の変化に対応させることができる。

2.2 各要素のモデル化

図-2 は、格子モデルにおけるはり断面の区分の概念図である。ウェブコンクリート部分を図-2 に示すように、トラス部分とアーチ部分に区分す

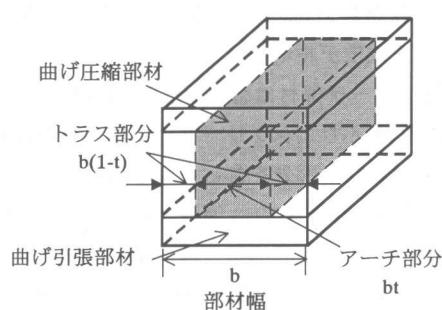


図-2 格子モデルの断面図

*1 東京工業大学大学院 理工学研究科土木工学専攻（正会員）

*2 東京工業大学大学院教授 理工学研究科土木工学専攻 工博（正会員）

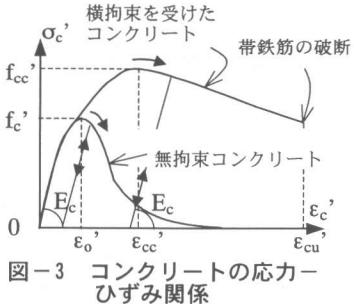


図-3 コンクリートの応力-ひずみ関係

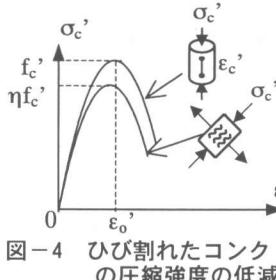


図-4 ひび割れたコンクリートの圧縮強度の低減

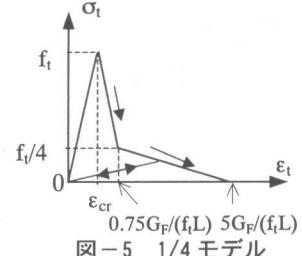


図-5 1/4 モデル

る。それぞれの要素の幅は、アーチ部分は bt 、トラス部分は $b(1-t)$ ($0 < t < 1$) となる。この時、 t 値は、はりの初期状態における微小な強制変位に対する、部材全体のポテンシャルエネルギーが最小となるように定める。本研究では、柱頭の水平力載荷点位置においてせん断スパンの 1/1000 の非常に微小な変位で強制載荷して、この時に生じている各部材の応力、ひずみからひずみエネルギーを計算した。このひずみエネルギーと外力のなす仕事をから定義されるポテンシャルエネルギーが最小となる時の t 値を求め、以後の格子モデル解析に用いた。

また、コンクリートの水平部材の断面積は、曲げ圧縮部材、曲げ引張部材それぞれ、軸方向鉄筋の中心位置から断面の最外縁までの距離の 2 倍に部材幅 b を乗じたものとした。

2.3 材料モデル

(1) コンクリートの圧縮部材

適切な量の横方向補強筋によってせん断補強されていれば、コアコンクリート部分には拘束効果が期待できる。本研究では、せん断補強筋による拘束効果を考慮するために、圧縮応力-ひずみ関係を Mander らの提案²⁾に基づき、図-3 のようにモデル化し、コンクリートの斜め圧縮部材、アーチ部材に適用した。この時、斜め圧縮部材はかぶりコンクリート、つまり拘束効果が期待できない部分を含むような部材となっている。しかし本研究では、簡易なモデル化という観点から、斜め圧縮部材には一律に拘束効果を考慮した応力-ひずみ関係を組み込んでいる。

さらに、コンクリートの斜め圧縮部材、アーチ部材に以下のモデルを考慮している。Collins らの実験的な研究³⁾によると、ひび割れたコン

クリートでは、引張ひずみ ϵ_t の増加に伴い、その直交方向の圧縮強度が低下することが知られており、その軟化の程度を式(1)で評価している。

$$\eta = 1.0 / \left[0.8 - 0.34(\epsilon_t / \epsilon_o') \right] \leq 1.0 \quad (1)$$

ここで、 $\epsilon_o' = -0.002$

軟化係数の決定に用いる引張ひずみ ϵ_t は、斜め圧縮部材では直交する斜め引張部材の引張ひずみを、アーチ部材では、代表的な値として支点付近のコンクリート斜め引張部材に生じている引張ひずみを用いた。

コンクリートの曲げ圧縮部材の材料モデルには、式(2)の Collins らの提案する応力-ひずみ関係³⁾を用いた。その概形を図-3 に示す。

$$\sigma_c' = -\eta \cdot f_c' \left\{ 2(\epsilon_c' / \epsilon_o') - (\epsilon_c' / \epsilon_o')^2 \right\} \quad (2)$$

除荷剛性、再載荷剛性はそれぞれのモデルの初期剛性を用い、直線的に応力が低下、もしくは回復するものとした。

(2) コンクリートの引張部材

コンクリートは、ひび割れ前は弾性的に挙動する。しかし、一旦ひび割れると引張軟化挙動をとると仮定することができる。本研究では、ひび割れ発生後のコンクリート挙動を表現するために、図-5 に示すように引張軟化曲線として 1/4 モデルを採用し、コンクリートの斜め引張部材に適用した。この時、コンクリートの破壊エネルギー G_F は 0.1 N/mm とした。

コンクリートの曲げ引張部材は、鉄筋を含んだ領域に位置しているため、コンクリートと鉄筋の付着作用によってひび割れ後も引張力を伝達することができる。そこで、コンクリート曲げ引張部材は、ひび割れ前は斜め引張部材と同様に弾性体と仮定し、ひび割れ発生後には、コンクリートと鉄筋の付着を考慮して岡村・前川

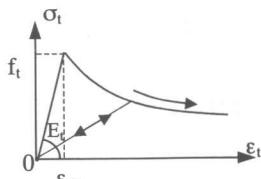


図-6 テンションスティフニングモデル

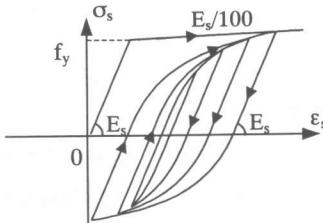


図-7 繰り返し載荷下での鉄筋応力-ひずみ関係

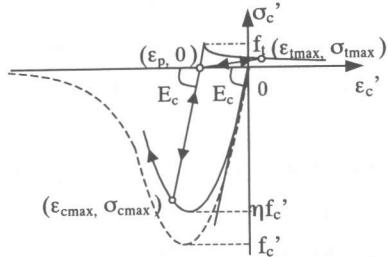


図-8 コンクリートの圧縮モデルと引張モデルの連続性

のテンションスティフニングモデル（図-6）を用いた。ひび割れ開始ひずみ ϵ_{cr} は 0.0001 とし、ひび割れ発生後の応力-ひずみ関係には式(3)を用いた。

$$\sigma_t = f_t (\epsilon_{cr} / \epsilon_t)^{0.4} \quad (3)$$

ここで、 f_t : コンクリートの引張強度

除荷、再載荷時の応力-ひずみ関係は原点指向型とし、直線的に応力が低下、もしくは回復するものとした。

(3) 鉄筋

鉄筋の応力-ひずみ関係は、バイリニアモデルとし、降伏後の勾配は、初期勾配 E_s の 1% とした。また、繰り返し載荷を受ける鉄筋のモデルには、応力が正負反転する際に現れるバウシンガー効果を考慮するために、加藤モデルと同等の精度を有し、かつ数値計算に適した数値モデル⁴⁾を用いた（図-7）。

2.3 コンクリートの圧縮モデルと引張モデルの連続性

コンクリートの圧縮モデルと引張モデルはそれぞれの方向に関して独立に成り立っているのではなく、一つの連続的なループを形成していかなければならない。本研究では、図-8 に示すように、圧縮モデルと引張モデルを単純に結ぶようにモデル化している。すなわち、コンクリ

ートの引張モデルから圧縮モデルへ移る場合、引張モデルの原点と圧縮モデルの原点を結ぶように仮定している。反対に、圧縮モデルから引張モデルへ移る場合は、圧縮モデルにおける圧縮塑性ひずみと引張モデルにおける引張応力 0 の時のひずみが等しいと仮定している。

3. 解析概要

3.1 実験概要

解析対象として、李らによって行われた RC 柱部材の正負交番載荷実験⁵⁾を用いた。供試体は片持ち柱形式の RC 正方形断面柱部材である。柱の高さは 570mm である。その断面の形状を図-9 に示す。また材料特性を表-1 に示す。

水平方向力の載荷方法は、載荷点水平変位で 1.71 mm, 2.85mm, 8.55 mm, 17.1 mm を基準とした変位振幅の一方向の変位振幅漸増方式である。この時、同一変位振幅の荷重繰り返し回数は 2 回である。本解析計算では実験と同様な載荷ステップの変位制御で増分計算を行った。

実験では、基本軸力 ($\sigma_0 = 1.96 \text{ MPa}$ (圧縮))を中心いて、 $\pm 1.96 \text{ MPa}$ の範囲で軸力を変動させている。軸力の増減は、図-10 に示すように、水平力に比例させるように定めている。本解析では、軸力決定のために用いる水平力に、直前

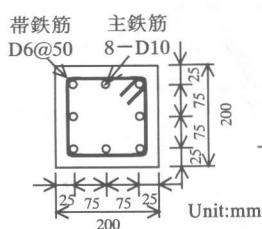


図-9 断面図

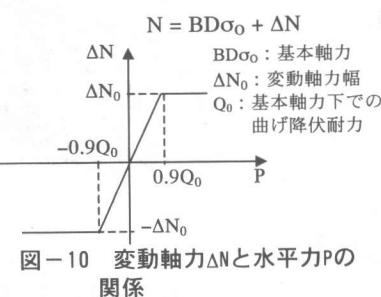


図-10 変動軸力ΔNと水平力Pの関係

表-1 コンクリート、鉄筋の材料特性

コンクリート (MPa)		f'_c	E_c
		27.4	22540
鉄筋 (MPa)		f_y	E_s
D10		417.5	211680
D6		386.1	176400

表-2 作用軸力

供試体 No.	基本軸応力度 (MPa)	変動軸応力度 (MPa)
U8-0	1.96 (圧縮)	0
U8-1	1.96 (圧縮)	± 1.96

のステップで柱基部に生じているせん断力を用いた。供試体番号と作用軸力を表-2に示す。

また、以下では水平力を与える際に、後述の図-11の左から押す側を正載荷、この反対側を負載荷と呼ぶこととする。

3.2 供試体のモデル化

3.1 に示す供試体を解析するために用いた格子モデルを図-11に示す。供試体は繰り返し水平力を受けるため、アーチ部材をクロスさせて配置しており、さらに、片持ち柱形式の供試体の解析を行うため、アーチ部材が載荷点と柱基部を結ぶ長い要素となっている。

また、実際の供試体の形状により近い形にするために、図-11に示すようにフーチング部をモデル化した。しかし、本解析では、柱基部（節点A及びB）の鉛直方向の変位は0.2mm程度であり、実験で見られるような抜け出しが再現で

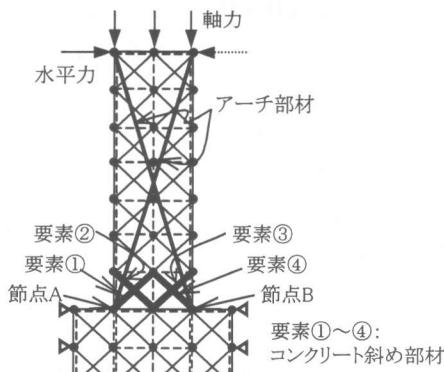


図-11 格子モデル

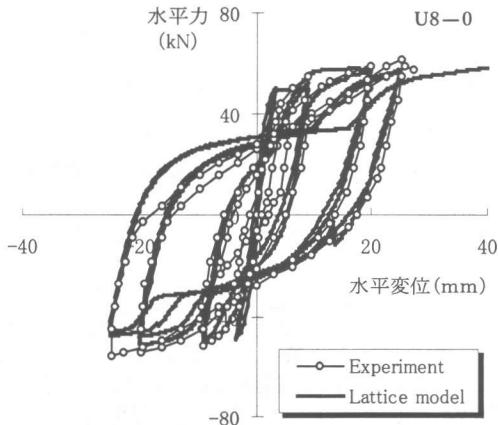


図-12 一定軸力を受ける場合の水平力-水平変位の関係

きていない。このような接合部には、さらに適切なモデル化が必要と考えられる。

4. 軸力を受けるRC柱部材の解析

4.1 RC部材の履歴特性

図-12、図-13は一定軸力、及び変動軸力が作用するRC柱部材の水平力載荷点における水平力と水平変位の関係であり、実験結果と格子モデルによる解析結果を示している。実験では、U8-0供試体（一定軸力）と比較して、U8-1供試体（変動軸力）は軸力が圧縮側に増加する（正載荷）時、最大耐力が大きくなり、また、軸力が減少する（負載荷）側の最大耐力が低くなっていることがわかる。格子モデル解析では、実験によって得られるこれらの履歴特性を塑性領域まで含めて妥当な精度で予測できていることがわかる。

続いて、格子モデル構成要素の応力-ひずみ関係を用いて、RC柱部材内部の耐荷機構の評価を試みた。図-14は、格子モデル解析によって得られた、柱基部のコンクリート斜め部材の応力-ひずみ関係の一例（U8-1供試体、要素②）である。図-12に示すU8-0供試体の解析では、載荷点水平変位-17.1mmの負載荷時に図-11中に示す要素①、③が圧壊し、これ以降の耐力が低下した。一方、U8-1供試体の解析（図-13）では、載荷点水平変位17.1mmの正載荷時に柱基部の要素①、③に生じる引張ひずみが

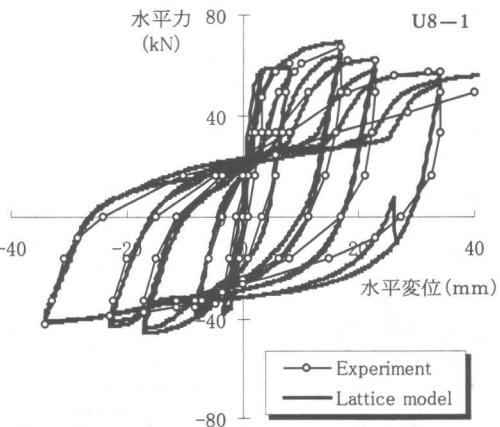


図-13 変動軸力を受ける場合の水平力-水平変位の関係

増大したために、それに伴って要素②、④の強度が、横拘束効果を考慮したコンクリート圧縮強度（38.5MPa）の約20%程度まで低下した。その結果、解析では図-14に示すように、これらの要素が、曲げと軸力により連成した圧縮力により大きく損傷を受けた。このことはU8-1供試体の実験において、正載荷側の最大耐力以降の耐力低下が著しいことと合致している。

また実験では、一定軸力、変動軸力を作用させたいずれの供試体においても曲げひび割れの発生、軸方向鉄筋の降伏、柱基部コンクリートの圧壊、かぶりコンクリートの剥離を経験して、最後に鉄筋の座屈によって終局状態に至っている。一方、格子モデル解析では、柱基部のコンクリートの圧壊までは実験結果と対応しているが、鉄筋の座屈に関する情報を組み込んでいたため、鉄筋座屈に起因する終局状態の予測は行えなかった。

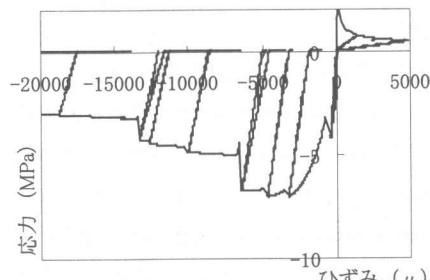
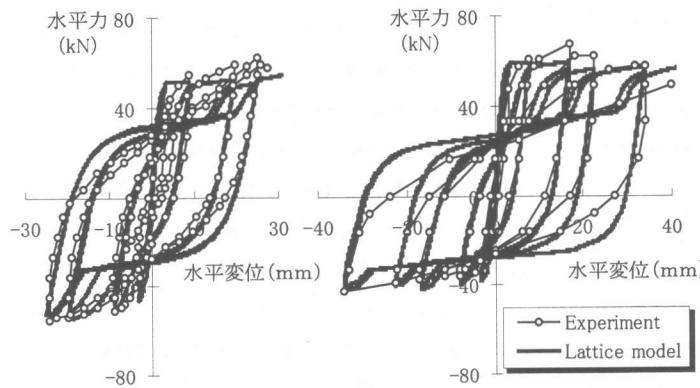


図-14 柱基部におけるコンクリートの応力-ひずみ関係(格子モデル解析結果、U8-1、要素②)



(a) U8-0供試体(一定軸力) (b) U8-1供試体(変動軸力)
図-15 水平力-水平変位の関係
(圧縮強度の軟化現象無視)

4.2 柱基部コンクリートの圧縮強度の軟化挙動が履歴特性に与える影響

格子モデル解析では、引張を受けるコンクリートの圧縮強度の軟化挙動に、Collinsらが提案するモデルを用いている。これは斜め圧縮要素に直交する斜め引張要素の引張ひずみが増加することにより、圧縮強度の軟化が進行すると仮定するものである。図-15には、圧縮強度の軟化現象を無視した場合の水平力-水平変位の関係を示す。また、図-16には、圧縮強度の軟化現象の影響による柱基部のコンクリート斜め圧縮部材の応力-ひずみ関係の違いを示す。U8-0供試体では、柱基部での曲げひび割れ幅が増大するが、斜めひび割れはあまり拡大しない。その結果、コンクリートの圧縮強度の低下があまり進行しないため、図-15(a)には図-12と比較して履歴特性に顕著な違いは見られない。一方U8-1供試体では、4.1に示したように載荷に伴い柱基部コンクリートの強度が低下し続ける。そのため、圧縮強度の軟化を無視した場合、図-16に示すように、載荷ステップを重ねても圧縮ひずみは依然弾性的な挙動を取る。その結果、図-15(a)に見られるように、載荷点水平変位17.1mm以降の載荷での耐力低下は見られず、また水平力の圧縮-引張が反転する際、除荷剛性から二次剛性へ変わる時の剛性の低下が表現できず、履歴が膨らんだ形になっている。

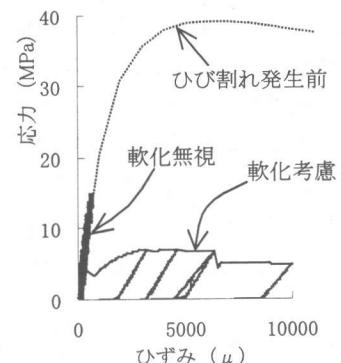


図-16 コンクリート圧縮強度の軟化現象を考慮した場合と無視した場合の柱基部コンクリートの圧縮応力-ひずみ関係の違い(U8-1、要素②)

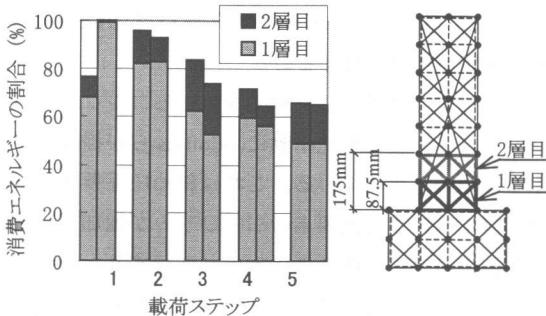


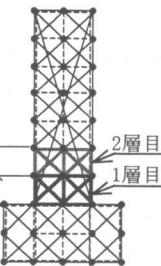
図-17 柱基部において格子モデル構成要素が消費したエネルギーとその計算時に着目した要素

4.3 履歴吸収エネルギー

構造物に作用している外力による仕事と構造物の吸収エネルギーが等しいと考えると、構造物の吸収エネルギーは、載荷点における水平力 - 水平変位曲線で囲まれる面積を計算することができる。図-17は、U8-1供試体において、載荷ステップ毎の水平力 - 水平変位から求めた履歴吸収エネルギーに対する、基部から87.5mmの区間（1層目）と、87.5mmから175mm区間（2層目）にあるコンクリート要素及び鉄筋要素（同図中）の消費エネルギーの割合を示している。この時、要素内の応力、ひずみはそれぞれ平均応力、平均ひずみであると仮定し、応力 - ひずみ履歴曲線に囲まれる面積が単位体積あたりの部材に消費されるエネルギーとし、これに各要素の体積を乗じたものを各構成要素の消費エネルギーとして計算した。この図より、第3載荷ステップまでは、基部から175mmまでの区間に全体の約80%のエネルギーが消費されている。それ以降でも、柱基部以外の部分でのエネルギーが消費されているが、基部から175mmの区間に60%程度消費されている。特に87.5mm以内の範囲で大部分のエネルギーが消費されていることがわかる。

5.まとめ

本研究では、格子モデルを用いて、一定軸力、及び変動軸力の作用しているRC柱部材の正負交番載荷実験の解析を行った。本研究から得られた結論を以下にまとめる。



(1) コンクリートに横拘束効果を考慮した応力 - ひずみ関係を採用し、さらに鉄筋のバウシンガー効果を考慮したモデルを組み込んだ格子モデル解析によって、一定軸力、または変動軸力作用下で、RC柱部材が繰り返し水平力を受けた場合の塑性領域まで含めた履歴特性を精度よく予測することができた。

(2) 格子モデル解析において、引張を受けるコンクリートの圧縮強度の軟化挙動にCollinsらが提案するモデルを用いると、斜めひび割れ幅の増大に伴って、柱基部のコンクリート強度が低下し、その結果コンクリートの圧壊に至るという一連の挙動を予測することができる。

(3) 軸力と水平方向繰り返し載荷を受けるRC柱部材において、格子モデル構成要素内の平均応力 - ひずみ履歴から求めた各要素の消費エネルギーは柱基部で集中し、実際の破壊状況で基部に破壊が集中していることに合致している。

参考文献

- 二羽淳一郎・崔 益暢・田邊忠顯：鉄筋コンクリートはりのせん断耐荷機構に関する解析的研究，土木学会論文集，No.508/V-26, pp.79-88, 1995.2.
- Mander, J. B., Priestley, M. J. N. and Park, R.: Theoretical Stress Modified Compression Field Theory for Reinforced Concrete Elements Subjected to Shear, Journal of Structural Engineering, Vol.114, No.8, pp.1804-1826, Aug., 1988.
- Vecchio, F. J. and Collins, M. P.: The Modified Compression Field Theory for Reinforced Concrete Elements Subjected to Shear, ACI Journal, Vol.83, No.2, pp.219-231, Mar./Apr., 1986.
- 福浦尚之・前川宏一：RC非線形解析に用いる鉄筋の繰り返し履歴モデル，土木学会論文集，No.564/V-35, pp.291-295, 1997.5.
- 李 康寧・小谷俊介・青山博之：変動軸力と水平2方向地震力を受ける鉄筋コンクリート柱の挙動，コンクリート工学年次講演会論文集，Vol.8, No.3, pp.489-492, 1986.